扬声器特性灵敏度的一种外推估算方法

杭 汝 衡
（中国科学院东海研究站）

一 前 言

一个扬声器的特性灵敏度是其性能的一个主要标志。需要定量测量并提供给使用者。关于特性灵敏度的定义及其测量方法，有各种不同的定义和标准[1]。例如美国电子工业协会(EIA)规定使用1毫瓦信号，在30英尺远测量，西德(DIN)和日本工业标准(JIS)规定使用1瓦功率在距离1米处收听；信号的类型也没有标准化，可以是粉红色噪声、白噪声，1000赫测试音，也可以是扫频音或颤音等。欧洲则用过功率为1瓦、频率为1000赫，接收距离为1米处的声压级作为灵敏度。我国参考的是国际广泛采用以粉红色噪声为信源，功率1瓦，接收距离为1米的标准。也有用正弦波作为信源时的一些研究工作[2,3]。

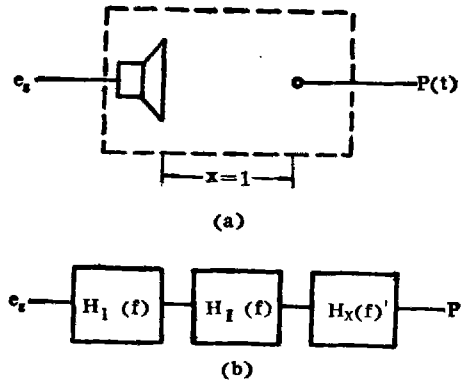
从基本概念上来分析，灵敏度是作为扬声器辐射功率效率的一个测度，这不但对使用者有参考价值，在生产上也是一个用来控制产品质量的指标。如何在生产上能够比较简单地实现灵敏度测量，对提高生产效率，提高产品质量都有现实的意义。因为标准的测量方法所要求的条件都比较高，尤其是在声学环境方面，要求在消声室内进行，同时还需要有比较复杂的仪器系统。这是因为在普通的房间内，很难满足自由场的条件，而这会对测量结果带来较大的影响。当然可以使用时间选通方式的测量仪器如丹麦B&K公司的Type4440(Gating System)，这类仪器设备比较复杂和昂贵。虽然这个方法也可以在普通房间内进行测量，达到消声室内的效果，但亦难于在生产流水线上能快速、简单地应用。

为解决上述的一些问题，已有文章探讨新的测量方法，例如基于线性系统理论的互易测量法[4]。其目的在于避开声学环境条件要求的困难。就方法而论，也是一种外推的计算方法。本文将从理论上以及实际应用上阐述一种扬声器灵敏度的快速外推估算方法。

二 理论方法

一个扬声器的特性灵敏度直接依赖于它自身的各个设计参数以及声场条件。建立这些参数同灵敏度之间理论上的表达式，是设计测量方法的基础。

把整个扬声器测量系统作为链接线性四端网络的方块图处理，如图1。



(a) 测量系统　　(b) 等效线性网络
图1 测量系统等效图

$$p(t)=\int_{-\infty}^{t} h(\tau)e_s(t-\tau)d\tau \qquad (1)$$

$$h(t)=\int_{-\infty}^{+\infty} H(f)e^{-i2\pi ft}df \qquad (2)$$

$$H(f)=H_{\mathrm{I}}(f)H_{\mathrm{II}}(f)H_x(f) \qquad (3)$$

改写为频谱形式

$$X_p(f)=H(f)X_{eg}(f) \qquad (4)$$

$X_p(f)$声压频谱，$X_{eg}(f)$电压频谱，$H_{\mathrm{I}}(f)$扬声器等效网络I，$H_{\mathrm{II}}(f)$扬声器等效网络II，$H_x(f)$声场传输等效网络的传输函数。

从基本定义出发，各四端网络的传输函数形式可以直接写出[5,6]。

$$H_{\mathrm{I}}(f)=\frac{BL_v}{(R_{vc}+R_v)+j\omega L_0}$$

$$H_{\mathrm{II}}(f)=\frac{1}{R_m+j\left(\omega M-\frac{K}{\omega}\right)}$$

B磁距间隙磁通密度，L_v音圈绕组长度，R_{vc}音圈直流电阻，R_v放大器内阻，L_0初级线圈电感，R_m等效总力阻，K等效总劲度，M等效总质量。

声场传输网络比较复杂，作为一个活塞振动的模型来分析是通用的方法。其一般表达式是一个复杂的积分式。考虑两个主要的情况。首先考虑低频近场的情况。当活塞振动时，活塞表面上的声压分布是不均匀的，可表为

$$H_x(f)|_{x=0}=-i\rho f\int_0^a ydy\int_0^{2\pi}e^{ikh}\left(\frac{d\psi}{h}\right) \qquad (5)$$

$$h=\sqrt{r^2+y^2-2ry\cos(\psi-\phi)}$$

只有当 $f<\frac{c}{2\pi a}$（c：声速，a：活塞半径。）条件满足，活塞表面上声压分布近似均匀，这时相当于活塞辐射面在$x=0$处以平面波形式向外辐射声波。即可得到

$$H_x(f)|_{x=0}\cong\rho c(\theta_0-ix_0) \qquad (6)$$

ρ密度，c声速，θ_0声阻比，x_0声抗比。此时在声轴x零点附近的声场，是平面波辐射转变为球面波辐射过渡的开始。即当x足够大时，声场以反平方关系衰减。而在x足够小时仍近似为平面波。从理论模型计算及实测结果基本符合的情况来判别，在x零点附近声场的扩展方式同用号筒辐射平面波时相似，因此在辐射面附近的辐射波的行为，可以用单参数波的近似波动解来说明。至于远场辐射波的近似表达式，则是大家所熟知的了。由此，声场传输网络表达式为

$$H_x(f)=\begin{cases}-i2\pi f\rho a^2\dfrac{e^{ikx}}{x} & x>x_F \qquad (7)\\ \rho c(\theta_0-ix_0)\cdot\dfrac{1}{y}e^{i\frac{\omega}{c}\tau} & \begin{pmatrix}0<x<x_n\\ f<\dfrac{c}{2\pi a}\end{pmatrix}\end{cases}$$

$x_N<x<x_F$是过渡区，$y=f(x,h)$，h和τ是单参数波所依赖的等效号筒参数。

至此，已经获得总网络传输函数$H(f)$的表达式，所取的模$|H(f)|$即是通常所称的幅度频率响应。

下面将建立特性灵敏度的定量表达式。根据定义和标准，设使用粉红色噪声电压作信源激励扬声器，以⅓倍频程滤波接收在单位距离（$x=1$米）处的平均声压级就是灵敏度的值。

$$S\widetilde{P}L=20\log\frac{\widetilde{p}}{p_0} \qquad (8)$$

$$\widetilde{p}=\left(\frac{1}{N}\sum_i p_i^2\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (9)$$

$S\widetilde{P}L$特性灵敏度，p_i单个滤波器输出的噪声声压均方根值，p_0参考基准（$=2\times10^{-5}$帕。）

设$e_g(t)$是粉红色噪声，其功率谱密度写为$S(f)$，即有

$$S(f)=S_0\cdot\frac{f_L}{f} \qquad (10)$$

$$W=\int_{f_L}^{f_H}S(f)\,df=S_0f_L\int_{f_L}^{f_H}\frac{df}{f}$$

$$=S_0f_L\ln\left(\frac{f_H}{f_L}\right) \qquad (11)$$

W输入总功率，S_0常数，f_H通频段的上限频率，f_L通频段的下限频率。

按照定义，输入功率$W=1$瓦，则$S_0=\frac{1}{f_L}\cdot\frac{1}{\ln(f_H/f_L)}$。此时得到的输入功率谱密度$S(f)$为

$$S(f)=\left[\ln\left(\frac{f_H}{f_L}\right)\right]^{-1}f^{-1} \qquad (12)$$

此时输出声压的功率谱密度 $S_p(f)$ 应为

$$S_p(f)=|H(f)|^2_{x=1}S(f) \qquad (13)$$

滤波器输出均方根声压

$$p_i=\left[\int_{f_i-\frac{\Delta f_i}{2}}^{f_i+\frac{\Delta f_i}{2}}S_p(f)df\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$p_i=\left\{\left|H(f_i)\right|^2_{x=1}\left[\ln\left(\frac{f_H}{f_L}\right)\right]^{-1}\cdot\frac{\Delta f_i}{f_i}\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (14)$$

由于滤波器带宽相对不变，$\frac{\Delta f_i}{\Delta f_i}\equiv 0.23$

$$\widetilde{p}=\left\{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|H(f_i)|^2_{x=1}\left[\ln\left(\frac{f_H}{f_L}\right)\right]^{-1}\times 0.23\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (15)$$

最后得到

$$S\widetilde{P}L=10\log\left[\frac{1}{N}\sum_i\left|H(f_i)\right|^2_{x=1}\right]-10\log\left[\ln\left(\frac{f_H}{f_L}\right)\right]+10\log(0.23)-10\log p_0$$

$$S\widetilde{P}L=10\log\left[\frac{1}{N}\sum_i\left|H(f_i)\right|^2_{x=1}\right]-K_b+67.6 \qquad (16)$$

$K_b=10\log\left[\ln\frac{f_H}{f_L}\right]$通频段校正系数

从公式(16)已知，一旦知道频响曲线及通频段宽，特性灵敏度就决定了，理论上完全能够计算出来。

三　实际应用及误差分析

从上述结果可知，特性灵敏度取决于扬声器的频响。由于工艺结构及安装误差，材料质地不均匀等等，同一型号扬声器的频响有差异，也就导致灵敏度的差别。但是，从数学上来看，灵敏度是对$|H(f_i)|$平方平均后再取对数。其物理意义表明，特性灵敏度是扬声器在通频段内辐射功率平均值的度量，正因为这种通频段内功率平均的平滑效应，灵敏度对谱形的起伏影响的敏感性比较差。关于频响起伏对灵敏度的影响，可对(16)式进行理论分析。从实际应用的角度来看，我们的目的是求得简单实用的估测方法，在理论分析基础上，进行频响外推计算。改写式(16)

$$S\widetilde{P}L=10\log\left|H(f_S)\right|^2_{x=1}+10\log\cdot\frac{\left(\frac{1}{N}\sum_i\left|H(f_i)\right|^2_{x=1}\right)}{\left|H(f_S)\right|^2_{x=1}}-K_b+67.6$$

$H(f_S)$是选定的某一个合适的频率 f_S 的传输函数。对一组同型号的扬声器，$|H(f_S)|^2$与$\frac{1}{N}\sum_i|H(f_i)^2$是两个可测的随机变量。因此可以用统计方法求得它们的统计参数。用消声室内对不同型号扬声器进行大量测量的结果分析，得到同一型号扬声器频响的一致性是很好的，低频尤其如此。作为例子如图2所示。其分布直方图表明，其偏差是不大

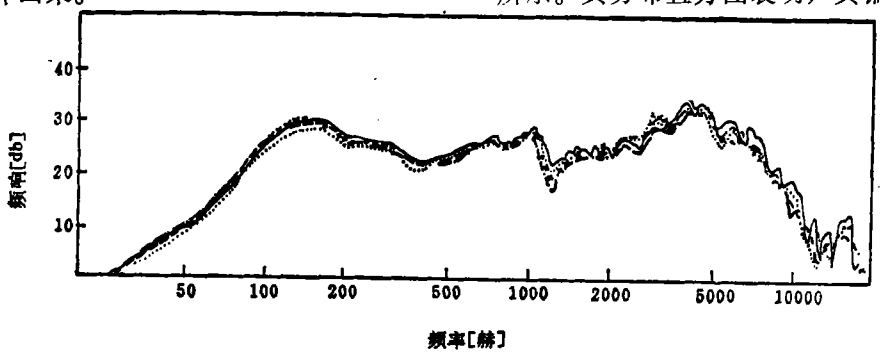
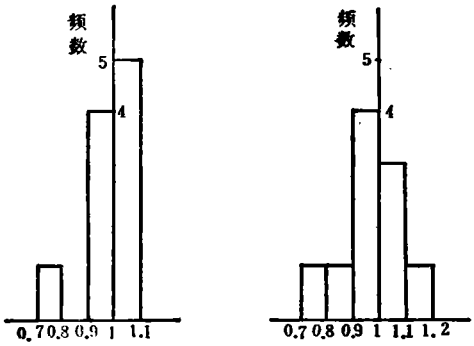


图2　消声室内测量一组扬声器(飞乐 YD_2—1651 型)频响曲线



$$r=\frac{|H(f_s)^2}{\overline{|H(f_s)^2}} \qquad r=\frac{\frac{1}{N}\sum_i|H(f_i)|^2}{\overline{\frac{1}{N}\sum_i|H(f_i)|^2}}$$

图 3　分布直方图($YDT_2-12192$, $N=10$, $s=0.12$

的(如图 3 所示。)因此，用下式作外推估算：

$$\widetilde{SPL}'=10\log\left|H(f_S)\right|^2_{x=1}+K_a-K_b+67.6 \tag{17}$$

$$K_a=\log\frac{\overline{\left(\frac{1}{N}\sum_i|H(f_i)|^2\right)}}{\overline{|H(f_S)|^2}}$$

$\overline{\left(\frac{1}{N}\sum_i|H(f_i)|^2\right)}$和$\overline{|H(f_S)|^2}$ 为平均值。公式(17)指明，这时估计灵敏度只取决于 1 个频率的响应，而不必测量全频段内所有频率的响应。

由公式(16)和(17)来估算灵敏度其误差范围如何呢？这通过实际测量来给予检验。使用飞乐电声总厂的测量数据作为例子来加以说明。例如选出一组扬声器 (YDT_2-12192) 在消声室所测得的频响。与此同时，用粉红色噪声作信源测量扬声器的灵敏度。将用粉红色噪声测得的灵敏度$(\widetilde{SPL})_P$同根据频响用(16)计算所得$(\widetilde{SPL})_A$相比较，其结果见图 4 。比较结果可以看到最大偏差在 ±0.5 分贝以内。这样的误差已经落在测量误差范围内。因此，证明理论分析是正确的。

除了直接计算外，还发展了一种外推估计$\widetilde{SPL}'$。亦即利用频响的统计平均来对扬声器灵敏度作出估计。估计值由(17)给出。考察估计的误差范围可由图 5 中看到。图中给

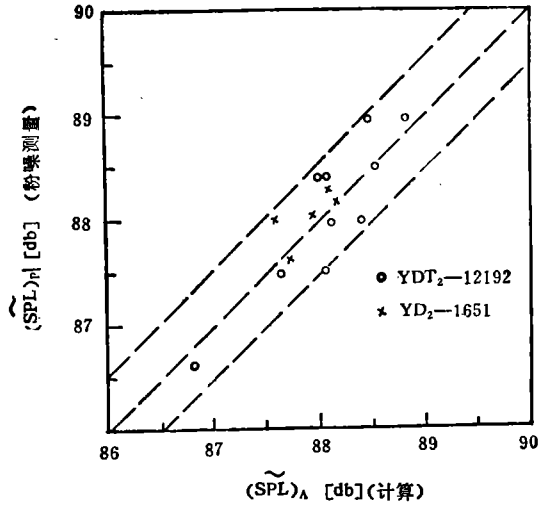


图 4　粉噪测量与理论计算比较

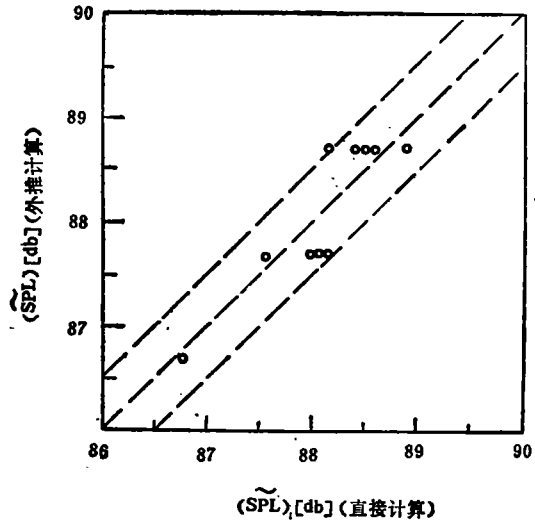


图 5　外推灵敏度比较

出外推估计灵敏度偏离直接计算灵敏度最大误差在 ±0.6dB 以内。把式(16)和(17)综合起来考虑，第一类误差是测量偶然误差，第二类是统计误差。两类误差是独立的。根据误差传递时合成的均方叠加原理，总的合成误差在 ±1.1dB 以内。这样的误差范围在实际应用中是完全允许的。

在实际空间比较狭窄以及背景干扰噪声比较大的场合，要测量在 1 米处的声压时，声场环境不允许，同时特别在低频段，信噪比会太低而使测量误差大大增加。这个问题

的解决可以考虑近场外推的方法。将(17)改写

$$\widetilde{SPL}''=10\log\left|H(f_S)\right|^2_{x=0.05}+K_x+K_a-K_b+67.6 \qquad (18)$$

$$K_x=10\lg\frac{\left|H(f_S)\right|^2_{x=1M}}{\left|H(f_S)\right|^2_{x=0.05M}}$$

$\widetilde{SPL}''$ 灵敏度外推估计，K_x 距离校正系数。

这时选取 $f_S<\frac{c}{2\pi a}$，当 f_S 足够低，或(7)中 θ_0 趋于 $\frac{1}{2}(ka)^2$，x_0 趋于 $\frac{8}{3\pi}ka$。根据实际测量声场衰减的拟合表明(图 6)用指数型号筒辐射声场近似表达是合适的。这时可有

$$H(f_S)_x\cong -i\frac{16}{3}\rho fae^{-(x/h)}e^{i(\frac{w}{c}r)}$$

$$x_0<x<x_N$$

作为例子，取 $x=5$ 厘米，$f_S=63$ 赫，测得的校正系数

$K_x=-34.8$db，(参数 $x_N=10$ 厘米，$h=5.1$ 厘米。)

这说明直达波信号强度提高，使得测量信噪比提高(如 34.8db)这时存在着的背景干扰噪声以及能引起多次反射的声学环境的影响都可加以忽略。

四 结 语

这里提出的方法，概括起来说就是包含着两种外推的意义。一是从近场测量外推至

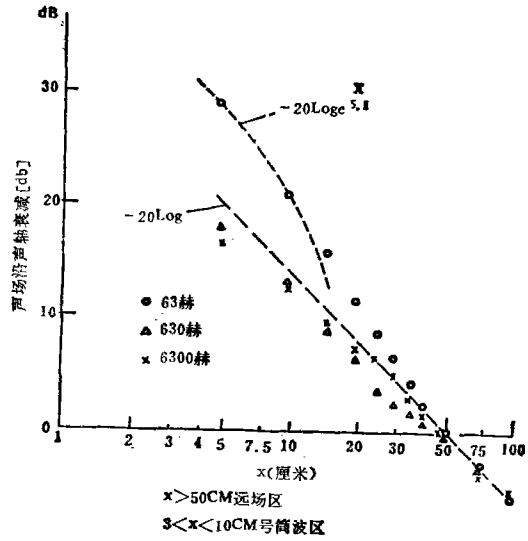


图 6 声场传输网络理论估算和实测比较

远场标准距离；还有就是利用消声室测量频响的统计平均结果，从低频单值测量外推至全频段的等效频响。这种方法所得的结果同消声室内标准方法测量的结果比较其误差范围可以在 ±1.1dB 以内。这在实用上是允许的。而这样使得灵敏度估测在场地狭小，噪声干扰很强的生产现场，用最简单的仪器就可以快速地实现。这就是本方法的优点所在。

参 考 文 献

[1] «家用音响设备»A.J 韦尔斯，科学技术出版社，(1982)

[2] IEC268-5

[3] 关于扬声器特性灵敏度测量 余家升，孙广荣 电声技术N1，1982

[4] 互易法测量扬声器灵敏度 张积元等 电声技术N2，1983

[5] 稳定扬声器纸盆谐振频率的因素，瞿世香 电声技术N1，1982

[6] «振动与声»P. M.莫尔斯 科学出版社(1974)